

脳機能イメージングを用いたトランポリン競技者の 内因的技術特性の評価に関する研究

——技術習得と脳活動領域に関する一考察——

山 崎 博 和

目的

レベルの高い競技選手を育成するためには長い時間が必要である。指導とトレーニングに時間をかけることで、選手のレベルを向上させるとともに、いわゆる厚い選手層を構築することが可能となることから、選手育成の時間を確保するためには、より早い時期に選手の才能を見出すことが重要な要素のひとつとなる。

しかしながら実際には習得した技術の完成度や、いわゆる「センス」と呼ばれるあいまいとしたものから将来性を見出さねばならず、現状では技能を習得する過程で指導者がそれらをどれだけ早い段階で把握できるかが人材の早期発見を左右しているといっても過言ではない。

技能の習得は、運動学習と呼ばれる一連の学習過程で説明できると考えられるが、運動学習が実際にどのように制御されて成り立つかは不明な点も多い。一方で、ロボット工学の分野では、フィードバックモデルを含めた計算モデルによって表現される運動学習が、人の運動学習過程を大筋で表現できていると考えられており（川人 1986: 1844–1893、川人 1995: 11–19）、実際に学習と制御のフィードバックによる強化学習モデルを用いることによって運動を学習させることが可能である（森本 1999: 2118–2131）。

運動学習における人を対象とした脳科学研究は数多くなされているが（松田 2011: 117–122、Volkman 1998: 2149–2154）、いずれも仰臥位や座位など姿勢を制限した上で、静的な運動を対象としたものである。脳機能計測の中でも Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) や Positron Emission Tomography (PET) などの装置では計測空間そのものが狭小で、動きが制限されることや、頭部や身体の大きな動きがノイズとなりシグナル・ノイズ比 (S/N 比) が激減し本来の信号が捉えられなくなることが原因である。一方、近赤外光を用いた Near Infrared Spectroscopy (NIRS) 計測は、計測空間が開放であるため前述の計測装置と比較して体の自由度が大きいことや、非侵襲の計測であるため運動学習に適していることから、近年は NIRS 計測を用いた運動学習研究が増えている（内藤 2008: 50–55）。

NIRS 計測は、近赤外光を用いて吸光度の変化から局所的なヘモグロビン量の変動を 2 次的に推

定する装置で、NIRS 計測装置のひとつである光トポグラフィは、得られた信号を脳活動として評価することができる。特に、Villringer (1993: 101-104)、Hoshi (1993: 1842-1846, 1993 5-8)、Kato (1993: 516-520) の研究により、脳神経活動に伴って脳内のヘモグロビン濃度が変化することが明らかになったことで、神経活動領域を推定することが証明されたことや、Maki らの研究 (1995: 1997-2005) によって空間的な評価に関しても有効性が示されたことから急速に NIRS 計測を用いた脳機能研究が進んだ。

Volkman による NIRS 計測を用いた運動学習の研究 (Volkman 1998: 2149-2154) によれば、小筋群による末端の微細な運動の学習過程において、学習初期では運動前野が活動し、運動学習の後期から運動習得後にかけては補足運動野が活動することが報告されており、NIRS 計測の運動学習研究への実用性が期待される。

そこで本研究では、競技者の能力を早期に発見するための方法を模索する手段のひとつとして技術習得過程における脳機能の変化を検討することを目的に、トランポリン競技者を対象に、課題想起時の脳活動について基礎検討を行った。

方法

1. 対象者

4 名のトランポリン競技者を対象に実験を行った。被験者にはあらかじめ実験に関して十分に説明した上で、同意を得られた選手のみを対象とした。

2. 脳機能計測

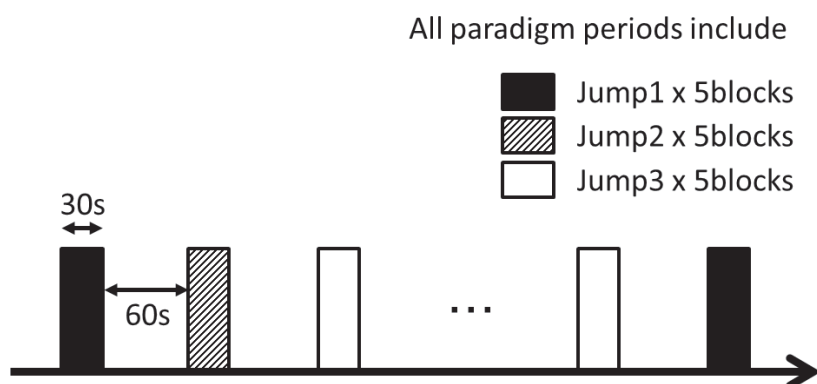
脳機能計測には光トポグラフィ ETG7100 (日立メディコ) を用いた。前頭部と頭頂部に計測プローブを配置し、全 46 チャンネルからデータを取得した。データは 10Hz でサンプリングした後、吸光度を、単位光路長あたりのヘモグロビン濃度 (mMol/mm) に変換したデータを保存し、その後の解析に用いた。

3. 計測パラダイム

被験者は座位でプローブを装着したのち、信号が安定するまで安静にした。

計測は 3 種類の種目 (ジャンプ) を 5 ブロックずつ含んだ、全 15 ブロックで構成されたブロックデザインを採用した。刺激はディスプレイにマークと文字で呈示し、安静の際はフィグゼーションと呼ばれるディスプレイ中央に表示される十字のマークを注視させた。

被験者はディスプレイに表示された文字により指示された種目を 30 秒間想起する。刺激の期間は種目が視覚的に表示されるほかに、音により開始と終了のタイミングを被験者に呈示した。刺激終了後は 60 秒間の安静を経た後、再び音とディスプレイ表示にて次のジャンプの想起を指示する。すなわち、1 ブロックはジャンプ想起 30 秒とその後の安静 60 秒で構成されており、ランダムに呈示される 3 種類のジャンプをそれぞれ 5 回ずつ含む全 15 ブロックを繰り返した〔図 1〕。



〔図 1〕 本研究における計測パラダイム

4. 刺激課題

本研究では、国際体操競技連盟によるトランポリンの得点コード（Fédération international de gymnastique）に基づき、選手間ではよく知られた、難易度の異なる 3 種類の種目、すなわち、ストレートジャンプ、ダブルバック、ダブルツイストを刺激課題として採用した〔表 1〕。ストレートジャンプは垂直方向に跳躍し、回転や捻りなどの動作を加えずにそのまま落下するジャンプである。演技では、主たる種目に入る前の、予備跳躍的種目となることから、ほとんどの競技者は早い段階で習得し、本研究におけるすべての被験者も習得済みの種目である。ダブルバックは後方抱え込み型 2 回宙返りと呼ばれるもので、2 回宙返り系の種目としては多くの競技者が初めて習得する種目である。ダブルツイストは後方伸身一回宙返り 2 回捻りと呼ばれる種目で、軸が曲がらないようにするための高度な技術が必要となり、本研究で採用した 3 種のジャンプの中では最もむずかしい種目となる。

〔表 1〕 想起刺激に用いた種目と特徴

ストレートジャンプ	ダブルバック	ダブルツイスト
垂直方向の跳躍。 主たる種目に入る前の予備跳躍の種目。	2 回宙返り系種目としては多くの競技者が初めて習得する種目。	1 回宙返りの中では難易度が高く、軸が曲がらないようにするための技術が必要となる。

5. 解析

得られたデータの解析は、信号解析用ソフトウェア MATLAB (Mathworks Inc) を用いて、オフラインで解析を行った。観測信号に 0.1Hz-0.8Hz の帯域のデジタルバンドパスフィルタを適用して、全身循環系由来の信号を除去したのち、各ジャンプ 5 ブロックを加算平均したものを平均的な応答変動として被験者間の比較に用いた。

結果

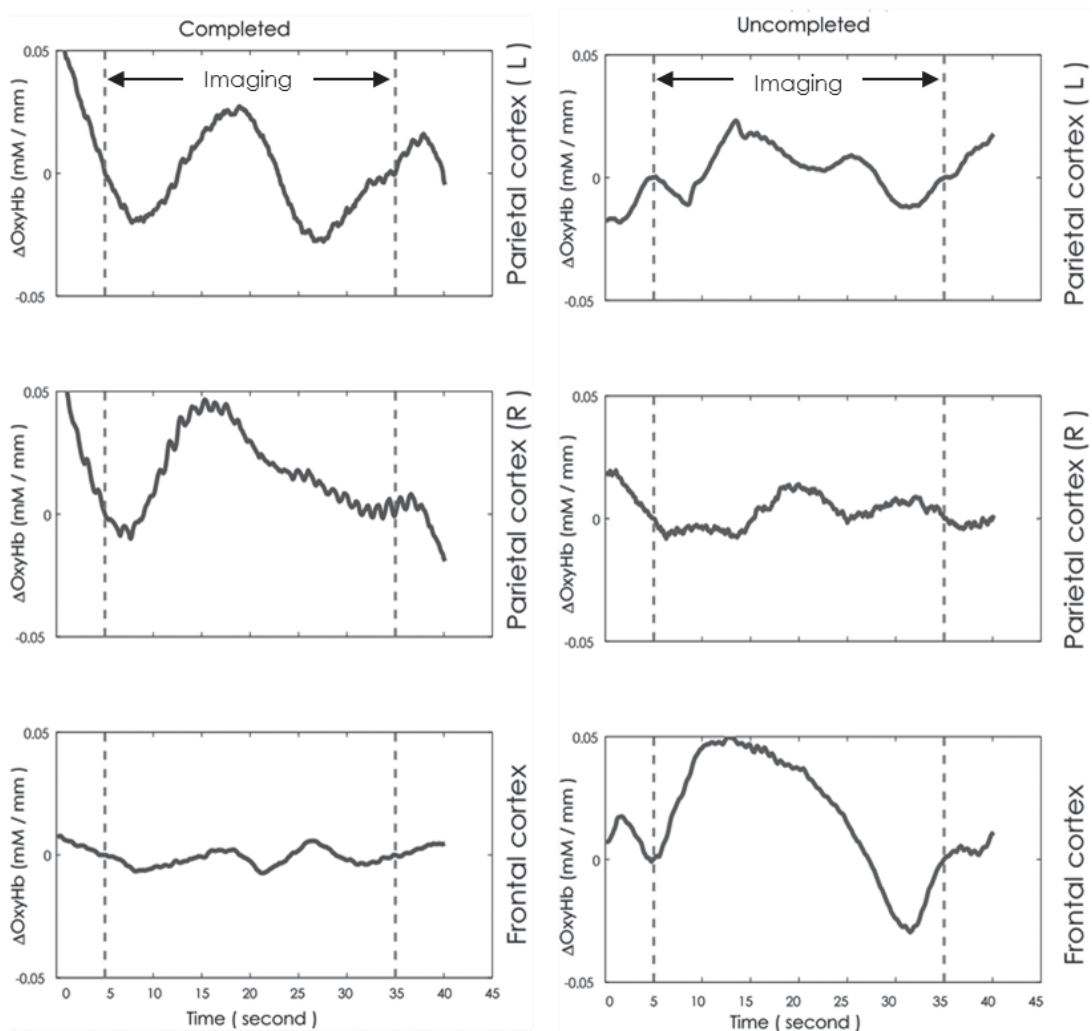
〔図 2〕 に、ダブルツイストが完成している被験者（左列）とそうでない被験者（右列）1 名ずつにおける酸素化ヘモグロビン変動を示した。上段は左頭頂部、中段は右頭頂部、下段は前頭部において観察された経時的変動を示している。

いずれの被験者でも、課題遂行時に局所脳血液量変動の増加が認められたものの、想起する種目や、被験者個人の種目完成度によって活動の局在性や変動パターンに違いが見られた。

未完成の被験者では前頭部の酸素化ヘモグロビン濃度が、該当する種目の想起時に大きく上昇することが観察されたが、完成している被験者では前頭部の酸素化ヘモグロビン濃度に大きな変動がみられなかった。

一方、頭頂部の信号に左右差はほとんど認められなかったが、ダブルツイストの未完成者では完成者に比べて信号が若干小さい傾向が認められた。

また、他の 2 名の被験者についても一部のチャンネルについては同様の傾向が認められたが、S/N 比の良好なチャンネルが少ないことから計測点不足と考え、今回の解析からは除外した。



〔図 2〕 ダブルツイスト想起時における酸素化ヘモグロビン変動の比較

(左：完成者、右：未完成者)

考察

本研究では、技術の習熟度と脳機能の関係について、トランポリン競技者を対象に、運動想起時の局所脳血液量変動を計測し、種目の完成度と局所脳血液量変動について比較した。

種目想起時の脳活動は特に、種目が完成している被験者とそうでない被験者の間で、活動領域および脳活動の変化に違いが見られた。完成している被験者では、頭頂部の運動野と呼ばれる部位の局所血液量が増加し、前頭野の局所血液量がほとんど変化しないという傾向が観察された。一方、種目が未完成の被験者では、前頭前野の局所血液量が種目想起に同期して大きく上昇した。

前頭前野は短期記憶や思考、集中力などに関与していることが知られていることから、未習得の課題はさまざまな情報を使いながら遂行していることが推測される。

内藤ら（2008: 50-55）によれば、単純動作と複雑動作を行った際の脳の賦活領域を比較すると、複雑な動作をする際に脳血液量が増加することが明らかとなっている。つまり、課題のむずかしさが脳活動を惹起する可能性があることを示唆しており、本研究で見られた前頭部の活動の違いも、課題のむずかしさが表現されたものと考えられる。

一方、熟練者では頭頂部の活動に大きな変動が認められた。本研究では、想起刺激を用いていたことから、実際の体の動きは制限した状態で計測していながら、運動野の活動がみられたことになる。前頭部の活動と合わせて考えると、熟練者と非熟練者では活動領域が異なっていたことから、技術の習得の過程で活動領域が変わる可能性が考えられた。

また、運動学習成立後には補足運動野が活動することが報告されており、運動が自動化されると、記憶に基づく運動を制御するとされている補足運動野が活動する（Volkman 1998: 2149-2154）。本研究で見られた頭頂部の脳活動は、すでに習熟済みの、すなわち自動化された種目の想起に、補足運動野がかかわっていた可能性が考えられる。しかしながら、光トポグラフィは他の脳機能計測装置、たとえば fMRI や PET などと比べて空間分解能に乏しく、ひとつの計測チャンネルに反映される脳活動の領域は比較的広い。本研究で得られた頭頂部の活動が、補足運動野に由来する信号であるかどうかはさらなる検討が必要であると考ええる。

トランポリンや器械体操など、全身で複雑な動きを表現する競技では、ロストスキルシンドロームと呼ばれる実行感覚の失調のような現象が選手や指導者の間で問題となっている（古 2005: 125-132, 2009: 181-191）。ロストスキルシンドロームの多くは、一度はほぼ完璧に習得した技術で生じることから、運動の自動化が進んだ状態の脳機能に何らかの変化が起こっている可能性も考えられる。本研究の結果から、脳機能計測を用いることで運動の習得状態を可視化できる可能性が示唆されたことから、技術習得の過程のみならず、その後の選手の技術管理にも応用できる可能性も期待できるといえる。

■参考文献■

- ・ Fédération international de gymnastique, Code de pointage de 2013 à 2016, Gymnastique au trampoline.
- ・ Hoshi Y., Tamura M., 1993, Dynamic multichannel near-infrared optical imaging of human brain activity. *Journal of Applied Physiology* Vol. 75, No. 4, 1842-6.
- ・ Hoshi Y., Tamura M., 1993, Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man. *Neuroscience Letters* Vol. 150 Issue 1, 5-8.
- ・ Kato T., Kamei A., Takashima A., Ozaki T., 1993, Human visual cortical function during photic stimulation monitoring by means of near-infrared spectroscopy. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism* Vol.

13, No. 3, 516-20.

- ・ Maki A., Yamashita Y., Ito Y., Watanabe E., Mayanagi Y., Koizumi H., 1995, Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography. *Medical Physics* Vol. 22, No. 12, 1997-2005.
- ・ Villringer A., Planck J., Hock C., Schleinkofer L., Dirnagl U., 1993, Near Infrared Spectroscopy (NIRS): A New Tool to Study Hemodynamic Changes during Activation of Brain Function in Human Adults. *Neuroscience Letters* Vol. 154, Issues 1-2, 101-4.
- ・ Volkmann J., Schnitzler A., Witte O. W., Freund H. J., 1998, Handedness and asymmetry of hand representation in human motor cortex. *Journal of Neurophysiology* Vol. 79, 2149-54.
- ・ 川人光男 1986 「随意運動制御における適応と学習」『日本ロボット学会誌』 Vol. 2 No. 2: 184-93。
- ・ 川人光男 1995 「脳の運動学習」『日本ロボット学会誌』 Vol. 13 No. 1: 11-19。
- ・ 内藤幾愛・大西秀明・古沢アドリアネ明美 2008 「単純動作と複雑動作時における脳活動の比較—近赤外分光法（NIRS）による検討」『理学療法学』 日本理学療法士学会 Vol. 35 No. 2: 50-5。
- ・ 松田雅弘・渡邊修・来間弘展・村上仁之・渡邊壘・妹尾淳史・米本恭三 2011 「非利き手による箸操作の運動時、イメージ時、模倣時の脳内機構の比較—機能的 MRI の検討」『理学療法科学』 日本理学療法士学会 Vol. 26 No. 1: 117-22。
- ・ 森本淳・鍋谷賢治 1999 「強化学習を用いた高次元連続状態空間における系列運動学習—起き上がり運動の獲得」『電子情報通信学会論文誌 D』 Vol. J82-D2, No. 11: 2118-31。
- ・ 古章子 2005 「トランポリン競技における Lost Skill Syndrome に関する臨床的研究—心理的要因が複合的に関与していた事例」『金沢学院大学紀要（情報科学・自然科学編）』 Vol. 3: 125-132。
- ・ 古章子 2009 「トランポリン競技における Lost Skill Syndrome に関する臨床的研究—自律性の問題がみられた事例」『金沢学院大学紀要（経営・経済・情報・自然科学編）』 Vol. 7: 181-191。

Evaluation of intrinsic practical characteristics of trampoline athletes using functional neuroimaging : A study on proficiency levels and cortical activity

Hirokazu YAMAZAKI

In this study, an experiment using near infrared spectroscopic imaging was executed to propose a new approach for finding the athletes' potential talent earlier in their history.

Four subjects were recruited from a university trampoline team and given informed consent before experiments. Optical topography was used in this study as functional brain imaging system. This system enables us to observe the changes in cortical hemodynamics evoked by external stimuli. Three types of jump (straight jump, double back and double twist) were adopted as imaginative tasks. Subjects imagine that they play those jumps, according to visual and auditory cue. One block includes 30-second task and 60-second rest, and all blocks paradigm include 15 blocks. Data were obtained continuously during executing those paradigms.

Changes in brain cortex hemodynamics between trained and untrained subjects were compared. An apparent difference was observed during imaging the double twist jump. In the trained subjects, hemodynamics in frontal cortex little altered due to stimulus onset. However, that in untrained subjects highly altered due to stimulus onset.

The results suggest that cortex activated area recruitment might be altered with the proficiency level in the trampoline.

脳機能イメージングを用いたトランポリン競技者の内因的技術特性の評価に関する研究 ——技術習得と脳活動領域に関する一考察——

山崎博和

本研究では、競技者の潜在的な能力を早期に見出すための新しいアプローチを提案するために、近赤外分光法を用いた実験を行った。

4名の大学トランポリン競技選手が実験に参加し、実験に関する説明を受け、実験参加の同意を得た。脳機能イメージング計測には光トポグラフィ装置を用いた。この装置は、外部刺激によって惹起された大脳皮質の局所ヘモグロビン変動を観測する。本研究では、ストレートジャンプ、ダブルバック、ダブルツイストの3種のジャンプを想起刺激として採用した。被験者は、視覚および聴覚によるキューに従って、これらのジャンプをしているのを想像する。一つのブロックは30秒のタスクと60秒のレストから構成され、すべての計測パラダイムは15ブロックで構成される。データはパラダイム実行中、連続的に取得した。

大脳皮質のヘモダイナミクスを熟練者と非熟練者と比較した。ダブルツイスト想起時にこれらに明らかな違いがみられた。熟練者では前頭部の脳血液量がほとんど変化しなかったのに対し、非熟練者では刺激のオンセットとともに大きく変化した。これらの結果は、皮質の活動領域の動員が、技術の習熟レベルによって変化する可能性を示唆していると考えられる。